

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental



EVALUACIÓN DE PARAMETROS DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA TOTAL A PARTIR DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE OSMOSIS INVERSA

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autores:

Carlos Cesar Arroyo Blanco

Danilo Monge Poma

Asesor:

Dr. Ricardo Rodríguez Vílchez.

Lima - Perú

2021

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	i
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	1
SUMMARY	2
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Realidad del problemática.	3
1.2 Bases Teóricas	11
1.3 Formulación del problema.	20
1.3.1 Problema General	20
1.3.2 Problemas Específico	20
1.4 Justificación	20
1.5 Objetivos	21
1.5.1 Objetivo General	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 Hipótesis	21
1.6.1 Hipótesis General	21
1.6.2 Hipótesis Específica	21

CAPITULO II. METODOLOGÍA	23
2.1 Tipo de investigación	23
2.1.1 Según el propósito: Explicativo	23
2.1.2 Según el diseño de investigación: Experimental factorial	23
2.2 Población y muestra	23
2.2.1 Población	23
2.2.2 Muestra	23
2.2.3 Materiales e instrumentos	25
2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	25
2.3.1 Método de análisis de datos	25
2.3.2. Procedimiento de análisis de datos	28
2.4 Equipo experimental del módulo de electrocoagulación	33
2.4.1 Descripción del equipo de electrocoagulación	33
2.4.2 Procedimiento de instalación	36
2.4.3 Alimentación del módulo de electrocoagulación	36
2.4.4 Fase experimental	36
CAPITULO III. RESULTADOS	38
3.1 Resultado de Parametros evaluados	38
3.1.1 Caracterización Fisico – Químico	38
CAPITULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	59
4.1 Discusión	59
4.2 Conclusiones	61
REFERENCIAS	62

ANEXOS	68
ANEXO 1: Matriz de consistencia.	68
ANEXO 2: Materiales	69
ANEXO 3: Instrumentos	70
ANEXO 4: Diagrama de Procesos	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Conservación y preservación de muestra de agua en función del parámetro evaluado.....	28
Tabla 2.Diseño factorial tres (03) por dos (02)	28
Tabla 3.Promedio del Análisis Físico Químico del agua residual proveniente de Osmosis Inversa.	35
Tabla 4.Resultados del pH.....	38
Tabla 5.Resultados de la conductividad.	39
Tabla 6.Resultados de la Dureza Total.	40
Tabla 7.Resultados de los Solidos Totales Suspendidos.	41
Tabla 8.Resultados de la Turbiedad	42
Tabla 9.Diseño factorial tres (03) por dos (02) completo.....	43
Tabla 10.Analisis de Varianza (Anova)	48
Tabla 11.Resumen del Modelo (Anova).....	49

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Reactores por el tipo de flujo.....	13
<i>Figura 2.</i> Ley de Faraday para electrocoagulación	15
<i>Figura 3.</i> Matriz Factorial	16
<i>Figura 4.</i> Esquema de una celda de electrocoagulación.	37
<i>Figura 5.</i> Probabilidad de normalidad.....	44
<i>Figura 6.</i> Varianza constante (Residuos vs. Ajustes).....	45
<i>Figura 7.</i> Prueba de independencia (Residuos vs. Orden).	46
<i>Figura 8.</i> Diagrama de Pareto	47
<i>Figura 9.</i> Efectos principales.....	49
<i>Figura 10.</i> Interacción de factores.....	50
<i>Figura 11.</i> Contorno de dureza total vs. Flujo; Voltaje.....	51
<i>Figura 12.</i> Contorno de dureza total vs. Volumen; Voltaje.	52
<i>Figura 13.</i> Contorno de dureza total vs. Flujo; Volumen.	53
<i>Figura 14.</i> Variación del pH en el postest.	54
<i>Figura 15.</i> Variación de la Conductividad en el postest.	55
<i>Figura 16.</i> Variación de la Dureza Total en el postest.	56
<i>Figura 17.</i> Variación de Solidos totales disueltos en el postest.	57
<i>Figura 18.</i> Variación de la Turbiedad en el postest.	58
<i>Figura 19.</i> Matriz de consistencia.	68
<i>Figura 20.</i> Materiales de construcción del equipo.	69
<i>Figura 21.</i> Instrumentos utilizados para la medición de los parámetros Físico Químicos.	70
<i>Figura 22.</i> Plano del equipo de electrocoagulación.	71

Figura 23. Módulo digital de la celda de electrocoagulación. 72

Figura 24. Módulo y Estructura de Electrocoagulación. 73

RESUMEN

La planta osmosis inversa genera como parte de su proceso agua residual con alto contenido de sales, comúnmente a esta corriente se le denomina rechazo o concentrado; en la mayoría de los casos estos se descargan a la red de alcantarillado.

La electrocoagulación es una técnica que se viene investigando para tratar aguas residuales industriales, domésticas y urbanas. Este proceso está dotado de una fuente de poder y de varios electrodos cuya finalidad es aportar iones desestabilizadores de partículas coloidales que remplazan las funciones de un coagulante como tratamiento convencional.

La investigación tiene como objetivo la evaluación de los parámetros de las variables de operación de un equipo de electrocoagulación con respecto a la reducción de la dureza total procedente del agua residual de Osmosis Inversa.

Para su evaluación se construyó un equipo de electrocoagulación con electrodos paralelepípedos de magnesio y acero inoxidable en forma de zigzag y se evaluó las variables de operación como: potencial eléctrico, flujo volumétrico y volumen tratado del agua residual.

En esta investigación se consideró las variables flujo de 100 mL/s. y 150 mL/s., potencial eléctrico de 4V y 7.4 V y Volumen de 1000 mL y 3000 mL.

Los parámetros más adecuados obtenidos de acuerdo a las variables de operación fueron los siguientes: flujo (150 mL/s.), potencial eléctrico (7.4 V) y volumen (3000mL); donde se obtuvieron una mayor remoción de la dureza total, alcanzando un porcentaje de reducción de 24.61%; donde la dureza total promedio se redujo de 534.355 a 427.70 (mgCaCo₃), cuyo valor se encuentra por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N°031-2010 SA.

Palabras clave: Electrocoagulación, Límites Máximos Permisibles (LMP), variables de operación.

SUMMARY

The reverse osmosis plant generates as part of its process waste water with a high content of salts, commonly this stream is called reject or concentrate; in most cases these are discharged into the sewer network.

Electrocoagulation is a technique that has been investigated to treat industrial, domestic and urban wastewater. This process is equipped with a power source and several electrodes whose purpose is to provide destabilizing ions of colloidal particles that replace the functions of a coagulant as a conventional treatment.

The present research aims to evaluate the parameters of the operating variables of an electrocoagulation equipment with respect to the reduction of the total hardness from the Reverse Osmosis wastewater.

For its evaluation, an electrocoagulation equipment was built with parallelepipedic magnesium and stainless steel electrodes in a zigzag shape and the operating variables such as: electric potential, volumetric flow and treated volume of waste water were evaluated.

In this investigation, the variables flow of 100 mL / s were considered. and 150 mL / s., electric potential of 4V and 7.4 V and Volume of 1000 mL and 3000 mL.

The most suitable parameters obtained according to the operation variables were the following: flow (150 mL / s.), Electric potential (7.4 V) and volume (3000mL); where a greater removal of the total hardness was obtained, reaching a reduction percentage of 24.61%; where the average total hardness was reduced from 534.355 (mgCaCo₃) to 427.70 (mgCaCo₃), whose value is below the Maximum Allowable Limits (LMP) established in the S.D. N ° 031-2010 SA.

Keywords: Electrocoagulation, Maximum Permissible Limits (PML), operating variables.

NOTA DE ACCESO

No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales.

REFERENCIAS

- Aguilar Asco. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Academias y organizaciones científicas miembros del Interamerican Network of Academies of Sciences (IANAS, 2019) Calidad del Agua en las Américas, Riesgos y Oportunidades.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016) Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.
- Arboleda Camacho, J. y Herrera López, P. (2015). *Evaluación de un proceso de Electrocoagulación en un Reactor tipo batch para la Remoción de Cromo Hexavalente (Cr+6) con electrodos de Aluminio – Aluminio y de Hierro – Aluminio en condiciones de Laboratorio*. Universidad Santo Tomás, Bogotá; Colombia.
- Aristizábal Castrillón, A. y Bermúdez Agudelo, M. (2007). *Estudio de la Factibilidad de un Sistema de Electrocoagulación para Tratamientos de Aguas procedentes de Lavanderías Industriales con fines de Reuso* (Título de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- Bermeo Garay. (2017). *Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Castillo Castro, C. y Oliden Arturo, B. (2017). *Influencia de la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la disminución de carga contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

Condori Pantoja. (2018). *Evaluación de la tratabilidad del efluente generado por un laboratorio metalúrgico aplicando la electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Cuba Tello, (2020). *Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate Vitarte* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinu y del San Jorge. (2012). *Toma de Muestras* (5). Recuperado de https://www.cvs.gov.co/jupgrade/images/stories/docs/varios/MA-LAB-CSV_02_Portafolio_de_Servicios_V3.pdf

Coronel Huamán, K y Vila Vera, G (2013). *Remoción de contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector parra del riego por el método de electrocoagulación mediante paneles fotovoltaicos, a nivel de laboratorio* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Castells Xavier, E. (2012). *Generalidades, Conceptos y Origen de los Residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Donneys Victoria et al. (2018). Electrocoagulación de soluciones de índigo carmín empleando ánodos de magnesio y de aleación AZ31. *DYNA*, 85(206), 528-567.

Elementos básicos de un diagrama de Pareto. (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/#what-is-a-pareto-chart>

Electrocoagulation. *International Research Publication House*, 10(1), 309-313.

Fernández Cirelli, Alicia. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química viva*, 11(3), 147-170.

- Ferreira Ascencio, Jorge. (2014). *Tratamiento y Disposición final de Agua Residual con alto contenido de Cloruros proveniente del Proceso de Producción de Petróleo Crudo, del Campo Santa Lucia de Petróleos del Norte s.a.* (Título de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- G. de Benitez y G. Pece. (2010). *Análisis de la Varianza en Experimentos Factoriales.* Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1(21), 1-47.
- Grafica de residuales incluidas en Minitab.* (s.f); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/residuals-and-residual-plots/residual-plots-in-minitab/>
- Gráficas de contorno y gráficas de superficie 3D, s.f.; (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/supporting-topics/graphs/contour-plots-and-3d-surface-plots/>.
- Guohua Chen (2003). *Electrochemical technologies in wastewater treatment.* Elsevier, 38(2004), 11-41
- Gráficas de probabilidad normal y la "prueba del lápiz grueso".* (s.f); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/normal-probability-plots-and-the-fat-pencil-test/>
- Helmy, E., Nassef E. & Hussein M. (2017). *Study on the Removal of Water Hardness by Electrocoagulation Technique.* International Journal of Chemical and Biochemical Sciences, 12 (1), 1-17.
- Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación.* Santa fe, México: McGraw W-HILL/INTERAMERICADA EDITORES, S.A. DE C.V.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *Calidad de agua. Muestreo.*

Parte3: Directrices para la preservación de las muestras.

Jaramillo Terán, Enelio. (2012). *Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de pintura y acabado textil* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

Lidia de Vargas. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.

Marón Ocampo, A. y Osés Pérez, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. Morelos, México: Comisión Estatal del Agua de Jalisco.

Malakootian M., & Yousefi N. (2009). The efficiency of electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 6(2), 131-136.

Métodos y fórmulas para el análisis de varianza en ANOVA de un solo factor. (s.f.); (2018).

Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/methods-and-formulas/analysis-of-variance/#degrees-of-freedom-df>

Malakootian M., Mansoorian H., & Moosazadeh M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*, 255(1-3), 67–71.

Municipalidad Distrital de Casma (2012). *Estudio Hidrogeológico de Agua Subterránea- Perforación de Pozo Tubular Sector Mojeque, Valle San Rafael*.

Ojeda Armaignac, Elaine. (2010). Estudio del Proceso de Electrocoagulación de la Vinaza empleando Electroodos de Hierro. *Tecnología Química*. 30(1), 21-30.

- Pérez Fernández, D. y Santos Souza, M. (2017). *Optimización de Parámetros de Operación en Procesos de Ultrafiltración para la eliminación de Materia Orgánica en la Regeneración de Aguas de proceso de una industria Papelera* (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Pinzón Gamboa, Erick. (2010). *Propuesta Técnica a Escala Piloto para la Remoción de Color de Origen Textil, por medio de Electrocoagulación para favorecer el proceso de Potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas* (Título de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Pooja, K., & Salkar, D. (2017). Review of Studies on Hardness Removal by Electrocoagulation. *International Research Publication House*, 10(1), 309-313.
- Piña, M., Martín, A., González, C., Prieto, F., Guevara, A., y Espinoza, G. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería*, 10(2), 257-271.
- Pérez, S., Morales, J., Navarro, F., Hernández, O. (2011). Evaluación del proceso de Electrocoagulación para la remoción de la turbidez del agua de río, agua residual y agua de estanque. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 79-91.
- Poma Javier, Johana y Quispe Sanca, Pamela. (2016). *Remoción de contaminantes de agua residuales urbanas por el método de electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- ¿Qué es ANOVA? (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>
- ¿Qué es una gráfica de efectos principales? (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-a-main-effects-plot/>

- Quispe Quispe, (2015). Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado la rinconada - Puno (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Reyes Ávila, D. y Mercado Martínez, I. (2003). Estudio de Tratabilidad por Electrocoagulación de los Lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda (Titulo de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Restrepo Mejía, Ana., Arango Ruiz, Álvaro y Garcés Giraldo Luis. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1(2), 58-77.
- Roccio Yauri, Luis. (2015). *Remoción de Contaminantes de Aguas Residuales Urbanas del Colector de agua de Las Vírgenes por Electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un Panel Fotovoltaico* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Siqueiros Tarazón, Alejandra. (2004). *Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta para el Mejoramiento de la Calidad del Aceite de Soya* (Titulo de pregrado). Universidad de Sonora, México.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL, 2000). *Tratamiento de agua Coagulación y Floculación*.
- Torres Ruiz, Juan. (2016). *Montaje de Planta de Tratamiento por osmosis inversa en Minería – Yanacocha* (Titulo de pregrado). Universidad Nacional del Callao, Perú.